

This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images may include (but are not limited to):

- BLACK BORDERS
- TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES
- FADED TEXT
- ILLEGIBLE TEXT
- SKEWED/SLANTED IMAGES
- COLORED PHOTOS
- BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS
- GRAY SCALE DOCUMENTS

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problem Mailbox.**

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

03P02692



⑮ **BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT**

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 100 63 722 A 1**

⑤① Int. Cl. 7:  
**G 05 B 19/416**  
G 05 B 19/404

⑳ Aktenzeichen: 100 63 722.1  
㉔ Anmeldetag: 20. 12. 2000  
㉕ Offenlegungstag: 11. 7. 2002

⑦① Anmelder:  
Siemens AG, 80333 München, DE

⑦② Erfinder:  
Quaschner, Bernd, 91091 Großenseebach, DE;  
Reichel, Theo, 91301 Forchheim, DE; Schäfers,  
Elmar, Dr., 90419 Nürnberg, DE; Westermeyer,  
Wilhelm, Dr., 90425 Nürnberg, DE; Wiegärtner,  
Georg, 91278 Pottenstein, DE

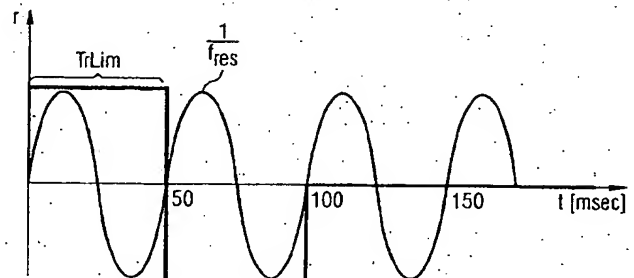
⑤⑥ Entgegenhaltungen:  
EP 06 85 779 A1  
EP 04 19 705 A1  
WO 96 12 992 A1  
WO 00 42 479 A1

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤④ Ruckbegrenzung mit Adaption der Bahndynamik

⑤⑦ Ziel der Erfindung ist es, eine kritische Resonanzfrequenz ( $f_{res}$ ) der Achsen eines bewegbaren Maschinenelementes mit einer Ruckbegrenzung bestmöglich zu bedämpfen. Eine gute Dämpfung bei einer gewünschten Frequenz erhält man, wenn die längstmögliche Zeit ( $TrLim$ ), die mit maximal zulässigem Ruck ( $rLim$ ) verfahren wird, so gewählt wird, dass  $1/TrLim$  auf die niedrigste Eigenfrequenz ( $f_{res}$ ) der beteiligten Achsen fällt. Diese Erkenntnis versucht die vorliegende Erfindung mit der Adaption der Bahndynamik umzusetzen, indem das sich mit den vorgegebenen Dynamikgrenzwerten ergebende  $TrLim = aMax/rLim$  vorzugsweise durch eine Reduzierung des maximalen Rucks ( $rLim$ ) so verändert wird, dass sich für die niedrigste Eigenfrequenz ( $f_{res}$ ) der beteiligten Achsen eine gute Dämpfung ergibt.



DE 100 63 722 A 1

DE 100 63 722 A 1

## Beschreibung

[0001] Die Erfindung bezieht sich auf ein Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine wie einer Werkzeugmaschine, einem Roboter oder dergleichen, wobei eine Bewegungsbahn des Maschinenelementes in unmittelbar aufeinanderfolgende interpolierbare Bewegungsabschnitte aufgelöst ist, sowie auf eine entsprechende numerische Steuerung.

[0002] Für die Geschwindigkeitsführung einer numerischen Steuerung, z. B. für eine Werkzeugmaschine oder einen Roboter, gehört heutzutage eine Ruckbegrenzung zum Stand der Technik. Damit soll eine geringere Belastung der einzelnen Achsen einer Maschine erreicht werden, ohne große Nachteile in der Programmbearbeitungszeit zu erhalten.

[0003] Die Glättungswirkung einer Ruckbegrenzung ist jedoch stark vom geforderten Sollwertverlauf abhängig. Messungen und theoretische Untersuchungen haben gezeigt, dass höherfrequente Beschleunigungs- und Bremsvorgänge mit geringerer Dynamik durchgeführt werden müssen, um die schwingungsfähige Mechanik nicht so stark anzuregen. Diese Abhängigkeit gilt sowohl bei kurzen Positioniervorgängen, als auch im Bahnsteuerbetrieb.

[0004] Derzeit wird als Abhilfe für dieses Problem der Ruck- und Beschleunigungsgrenzwert so niedrig eingestellt, dass auch hochfrequente Änderungen der Bahngeschwindigkeit die Schwingungen nicht zu stark anregen. Durch diese geringen eingestellten Dynamikwerte wird jedoch unerwünschterweise oftmals eine höhere Bahngeschwindigkeit und damit eine kürzere Programmbearbeitungszeit verhindert.

[0005] Eine bekannte Methode, um ein Maschinenschockendes Geschwindigkeitsprofil zu erhalten, ist eine Ruckbegrenzung mit einem kubischen Polynom, wie diese in den Darstellungen nach Fig. 1 und Fig. 2 gezeigt ist. Fig. 1 zeigt die Bahngeschwindigkeit  $V$  eines beweglichen Maschinenelementes über die Zeit  $t$ , während Fig. 2 den zugehörigen Beschleunigungsverlauf  $a$  zeigt. In einer Phase 1 wird auf die maximal zulässige Beschleunigung  $a_{\text{Lim}}$  verfahren. In Phase 2 wird konstant mit  $a_{\text{Lim}}$  weiterbeschleunigt, die Geschwindigkeit nimmt nur noch linear zu. In Phase 3 wird die Beschleunigung  $a$  abgebaut, also gebremst. Im Folgenden wird mit dem Begriff Beschleunigung immer auch die Möglichkeit einer negativen Beschleunigung zum Bremsen eingeschlossen.

[0006] Am Ende der Phase 3 ist somit eine maximal zulässige Bahngeschwindigkeit  $v_{\text{Lim}}$  erreicht, mit der in der Phase 4 weiter verfahren wird. In den Phasen 5 bis 7 wird die Geschwindigkeit  $v$  nun analog abgebaut, so dass die Bahngeschwindigkeit  $v$  bei Erreichen einer Sollposition Null beträgt. Dazu wird in der Phase 5 eine negative Beschleunigung aufgebaut, die in der Phase 6 konstant gehalten wird und in der Phase 7 schließlich wieder zu Null abgebaut wird. Bezüglich der Ruckbelastung einer Maschine ist die Steigung der Beschleunigung in den Phasen 1, 3, 5 und 7 kritisch. In diesen Phasen weist der Geschwindigkeitsverlauf einen polynomialen Verlauf auf, während in den übrigen Phasen die Geschwindigkeit linear verläuft.

[0007] Diese Art der Ruckbegrenzung zeichnet sich vor allem dadurch aus, dass sie nur zu einer geringfügigen Verlängerung der Programmbearbeitungszeit im Vergleich zur beschleunigungsbegrenzten Geschwindigkeitsführung führt. Sofern an einer solchen Maschine aufgrund der Ruckbegrenzung eine höhere Beschleunigung eingestellt werden kann, ist eventuell sogar eine kürzere Bearbeitungszeit mög-

lich.

[0008] Problematisch dabei ist aber, dass solche hochdynamischen Beschleunigungs- und Bremsvorgänge auf der Bahn in einem bestimmten Frequenzbereich zur Anregung von mechanischen Schwingungen führen können. Die Dynamik dieser Vorgänge sollte daher an die Maschinengegebenheiten angepasst werden.

[0009] Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es daher, eine Möglichkeit zu schaffen, um mit einer Ruckbegrenzung kritische Resonanzfrequenzen einer Maschine oder eines beweglichen Maschinenelementes zu bedämpfen.

[0010] Gemäß der vorliegenden Erfindung wird diese Aufgabe durch ein Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine wie einer Werkzeugmaschine, einem Roboter oder dergleichen gelöst, wobei eine Bewegungsbahn des Maschinenelementes in unmittelbar aufeinanderfolgende interpolierbare Bewegungsabschnitte aufgelöst ist. Dies wird erreicht, indem Beschleunigungsvorgänge mit bei der Interpolation resultierenden zugehörigen Ruckprofilen, die bei oder in einem Bereich nahe einer kritischen Eigenfrequenz des Maschinenelementes oder der Maschine liegen, so adaptiert werden, dass eine Zeit, die mit einem maximal zulässigen Ruck verfahren wird, im wesentlichen dem Kehrwert dieser kritischen Eigenfrequenz entspricht.

[0011] Die Aufgabe der Erfindung wird ferner durch eine numerische Steuerung zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine wie einer Werkzeugmaschine, einem Roboter oder dergleichen gelöst, wobei ein Interpolator zur Interpolation einer in unmittelbar aufeinanderfolgende interpolierbare Bewegungsabschnitte aufgelösten Bewegungsbahn des Maschinenelementes vorgesehen ist, indem durch eine Ruckbegrenzung solche Beschleunigungsvorgänge mit bei der Interpolation resultierenden zugehörigen Ruckprofilen, die bei oder in einem Bereich nahe einer kritischen Eigenfrequenz des Maschinenelementes oder der Maschine liegen, so adaptierbar sind, dass eine Zeit, die mit einem maximal zulässigen Ruck verfahren wird, im wesentlichen dem Kehrwert dieser kritischen Eigenfrequenz entspricht.

[0012] Dabei hat es sich sowohl für das Steuerungsverfahren, als auch für die numerische Steuerung als günstig erwiesen, wenn bei der Interpolation resultierende Ruckprofile mit einem bei oder in einem Bereich nahe einer kritischen Eigenfrequenz des Maschinenelementes oder der Maschine liegenden Verlauf anhand eines satzübergreifend über mehrere interpolierbare Bewegungsabschnitte im Voraus bestimmten Geschwindigkeitsverlaufs des Maschinenelementes auf dessen Bewegungsbahn ermittelt werden.

[0013] Besonders einfach und somit vorteilhaft lässt sich eine Adaption von ermittelten kritischen Beschleunigungsvorgängen erreichen, indem der maximal zulässige Ruck so lange variiert wird, insbesondere reduziert wird, bis die Ruckzeit im wesentlichen dem Kehrwert dieser kritischen Eigenfrequenz entspricht.

[0014] Wenn ein Faktor vorgegeben wird, mit dem der maximal zulässige Ruck maximal reduziert wird, so lässt sich eine unnötige Reduzierung der Bahndynamik vermeiden.

[0015] Eine vorteilhafte Ausgestaltung der Vorrichtung und des Steuerungsverfahrens der vorliegenden Erfindung verwendet als kritische Eigenfrequenz das Minimum der Eigenfrequenzen aller an der Bewegungsbahn des Maschinenelementes beteiligten Achsen.

[0016] Nach einer alternativen Ausgestaltung dient als kritische Eigenfrequenz ein Mittelwert der Eigenfrequenzen

aller an der Bewegungsbahn des Maschinenelementes beteiligten Achsen.

[0017] Eine weitere alternative Ausführungsform zeichnet sich dadurch aus, dass die kritische Eigenfrequenz durch eine Gewichtung der Eigenfrequenzen aller an der Bewegungsbahn des Maschinenelementes beteiligten Achsen erfolgt, wobei eine Gewichtung vorteilhafterweise anhand des Beitrags einer jeweiligen beteiligten Achse zur Bewegungsbahn des Maschinenelementes erfolgt.

[0018] Wenn für jede beteiligte Achse eine separate Adaption kritischer Beschleunigungsvorgänge erfolgt, wobei ein axiales Ruckprofil analysiert wird, indem für eine angenommene konstante Bahngeschwindigkeit des Maschinenelementes der resultierende axiale Geschwindigkeitsverlauf analysiert wird, so lässt sich auch eine Berücksichtigung von Konturkrümmungen oder Transformationen einer Bewegungsbahn erreichen.

[0019] Dabei hat es sich als vorteilhaft herausgestellt, wenn bei der Interpolation resultierende axiale Ruckprofile mit einem bei oder in einem Bereich nahe einer kritischen Eigenfrequenz der jeweiligen Achse liegenden Verlauf abschnittsweise satzübergreifend im Voraus ermittelt werden, wobei ein Abschnitt jeweils durch Minima oder Maxima des axialen Geschwindigkeitsverlaufs gebildet wird.

[0020] Dies erfolgt nach einer weiteren vorteilhaften Ausgestaltung, indem zur Adaption von ermittelten kritischen Beschleunigungsvorgängen für jeden analysierten Abschnitt des axialen Geschwindigkeitsverlaufs die maximale Bahngeschwindigkeit solange reduziert wird, bis die Ruckzeit im wesentlichen dem Kehrwert der kritischen Eigenfrequenz der jeweiligen Achse entspricht.

[0021] Eine weitere Verbesserung lässt sich erreichen, indem auch die längstmögliche Zeit, mit der mit maximaler Beschleunigung verfahren werden kann und/oder mit der mit maximaler Geschwindigkeit verfahren werden kann, auf die gleiche Frequenz wie die Ruckzeit oder ein Vielfaches davon adaptiert wird.

[0022] Für die erfindungsgemäße numerische Steuerung hat es sich dabei als vorteilhaft erwiesen, wenn die Ruckbegrenzung als ein linearisiertes digitales Filter ausgestaltet ist, das in jedem Arbeitspunkt des Maschinenelementes einen zugehörigen Rucksollwert liefert.

[0023] Mit der im vorangehenden beschriebenen Anpassung der Dynamik gemäß der vorliegenden Erfindung werden die hochfrequenten Änderungen der Bahngeschwindigkeit automatisch mit geringeren Ruck- oder Beschleunigungswerten durchgeführt. Damit wird zusätzlich ermöglicht, die Dynamikgrenzwerte zu erhöhen und damit einen Gewinn in der Programmbearbeitungszeit zu erhalten.

[0024] Die Wirkungsweise der Adaption der Bahngeschwindigkeit sowie weitere Vorteile und Details werden im folgenden anhand mehrerer Ausführungsbeispiele und in Verbindung mit den Figuren verdeutlicht. Es zeigen in Prinzipdarstellung:

[0025] Fig. 1 den Bahngeschwindigkeitsverlauf über die Zeit bei einer herkömmlichen Ruckbegrenzung mit einem kubischen Polynom;

[0026] Fig. 2 den zugehörigen Beschleunigungsverlauf bei einer herkömmlichen Ruckbegrenzung mit einem kubischen Polynom,

[0027] Fig. 3 einen ungünstigen Ruckverlauf mit Anregung einer Resonanzfrequenz von 20 Hz,

[0028] Fig. 4 einen günstigen Ruckverlauf für einen Resonanzfrequenz von 20 Hz,

[0029] Fig. 5 einen Bahnverlauf über die Zeit zum Verfahren in eine Sollposition,

[0030] Fig. 6 einen zugehörigen Bahngeschwindigkeitsverlauf über die Zeit,

[0031] Fig. 7 einen zugehörigen Beschleunigungsverlauf über die Zeit,

[0032] Fig. 8 einen zugehörigen Ruckverlauf über die Zeit,

[0033] Fig. 9 einen Frequenzgang der erfindungsgemäßen Ruckbegrenzung als ein linearisiertes Filter,

[0034] Fig. 10 einen Signalfussplan dieses linearen Filters,

[0035] Fig. 11 ein erstes Beispiel eines zeitoptimalen Bahngeschwindigkeitsverlaufs ohne Anpassung der Bahndynamik,

[0036] Fig. 12 den entsprechenden Bahngeschwindigkeitsverlauf mit erfindungsgemäßer Anpassung der Bahndynamik,

[0037] Fig. 13 ein zweites Beispiel eines zeitoptimalen Bahngeschwindigkeitsverlaufs ohne Anpassung der Bahndynamik und

[0038] Fig. 14 den entsprechenden Bahngeschwindigkeitsverlauf mit erfindungsgemäßer Anpassung der Bahndynamik und zusätzlicher Bahnglättung.

[0039] In den beiden Darstellungen nach Fig. 3 und Fig. 4 ist jeweils eine Schwingung mit 20 Hz über die Zeit  $t$  dargestellt, die eine einem beweglichen Maschinenelement zugehörige Resonanzfrequenz  $f_{res}$  darstellt. In Fig. 3 ist zusätzlich ein Ruckverlauf  $r$  dargestellt, der diese Schwingung stark anregt. Dabei fällt der Ruckverlauf exakt mit einer Halbwelle der Sinusschwingung zusammen.

[0040] In der Fig. 4 wird demgegenüber ein Ruckverlauf  $r$  dargestellt, wie er mit der Adaption der Bahndynamik angestrebt wird und der eine kritische Resonanzfrequenz  $f_{res}$  (hier 20 Hz) bestmöglich bedämpft, indem der Ruckverlauf  $r$  auf eine volle Schwingungsperiode  $1/f_{res}$  fällt. Dies ist der Fall, wenn die maximal zulässige Zeit  $TrLim$ , mit der mit maximalem Ruck  $rLim$  verfahren werden kann, der Periodendauer der Resonanzfrequenz  $f_{res}$  entspricht.

[0041] Im folgenden wird nun dargestellt, wie gemäß der vorliegenden Erfindung ein solcher günstiger Ruckverlauf nach Fig. 4 erzielt werden kann. Die Grundüberlegung dabei ist, alle Bahnrickverläufe mit einer höheren Frequenz als in Fig. 4 dargestellt durch eine Reduzierung des Ruckgrenzwertes möglichst nahe an den Idealfall aus Fig. 4 zu adaptieren.

[0042] Die Ruckbegrenzung wird dazu in der folgenden Beschreibung als ein linearisiertes Filter betrachtet. In einem bestimmten Arbeitspunkt, der durch die vorgegebenen Dynamikwerte (Ruck, Beschleunigung, Geschwindigkeit) und den gewünschten Weg gegeben ist, kann auf diese Weise die maximal zulässige Zeit  $TrLim$ , mit der mit maximalem Ruck  $rLim$  verfahren werden kann, aus diesen Vorgaben berechnet werden. Das gleiche gilt für die für die maximal zulässige Zeit  $TaLim$ , mit der mit maximaler Beschleunigung  $aLim$  verfahren werden kann, und die maximal zulässige Zeit  $TvLim$ , mit der mit maximaler Bahngeschwindigkeit  $vLim$  verfahren werden kann.

[0043] Der geometrische und mathematische Zusammenhang zwischen diesen Werten ist in den Fig. 5 bis 8 dargestellt. Dabei zeigt Fig. 5 den Bahnverlauf  $x$  über die Zeit  $t$  zum Verfahren eines Weges  $Xw$  in eine Sollposition  $xSoll$ . In Fig. 6 ist der zugehörige resultierende Bahngeschwindigkeitsverlauf  $v$ , in Fig. 7 das resultierende Beschleunigungsprofil  $a$  und in Fig. 8 der damit verbundene Ruckverlauf  $r$  über die Zeit  $t$  gezeigt. Für die Bahngeschwindigkeit  $v$  wird der Grenzwert  $vLim$ , für die Beschleunigung  $a$  der Grenzwert  $aLim$  und für den Ruck der Grenzwert  $rLim$  eingehalten. Das Profil ist so bemessen, dass unter Ausschöpfung aller dieser Grenzwerte die Sollposition  $xSoll$  schnellstmöglich erreicht wird. Daneben sind die bereits definierten Zeiten  $TrLim$ ,  $TaLim$  und  $TvLim$  sowie ein Rucksollwert  $rSoll$

eingetragen.

[0044] Der Bewegungsablauf ist in die gleichen Phasen 1 bis 7 unterteilt, die bereits im Zusammenhang mit Fig. 1 und Fig. 2 erläutert wurden. Dabei entspricht TrLim der Dauer der Phase 1, TaLim der Dauer der Phasen 1 + 2 und TvLim der Dauer der Phasen 1-4.

[0045] Eine Gesamtübertragungsfunktion ergibt sich dabei nach der folgenden Berechnungsvorschrift:

$$x_{\text{Soll}} = X_w \cdot (1 - e^{-s \cdot \text{TrLim}}) / (s \cdot \text{TrLim}) \cdot (1 - e^{-s \cdot \text{TaLim}}) / (s \cdot \text{TaLim}) \cdot (1 - e^{-s \cdot \text{TvLim}}) / (s \cdot \text{TvLim})$$

mit  $X_w = r_{\text{Soll}} \cdot \text{TrLim} \cdot \text{TaLim} \cdot \text{TvLim}$

[0046] In erster Näherung kann die Übertragungsfunktion der Ruckbegrenzung damit als

$$(1 - e^{-s \cdot \text{TrLim}}) / (s \cdot \text{TrLim})$$

angenommen werden. Dies wäre korrekt, wenn TaLim und TvLim durch die Ruckbegrenzung nicht verändert werden würden, z. B. da nun eine höhere max. Beschleunigung möglich ist. Die Zeiten TrLim, TaLim und TvLim sind abhängig von rLim, aLim, vLim und den Anfangs- und Endbedingungen für Position und Geschwindigkeit.

[0047] Ziel ist es nun, die kritische Resonanzfrequenz  $f_{\text{res}}$  der Achsen mit der Ruckbegrenzung bestmöglich zu dämpfen. Dafür wird die Übertragungsfunktion  $(1 - e^{-s \cdot \text{TrLim}}) / (s \cdot \text{TrLim})$  genauer untersucht, indem das Amplitudenspektrum bestimmt wird.

[0048] Der Amplitudengang berechnet sich zu:

$$|F(f)| = |\sin(\pi \cdot f \cdot \text{TrLim})| / (\pi \cdot f \cdot \text{TrLim})$$

[0049] Die Darstellung gemäß Fig. 9 zeigt eine Skizze des Amplitudengangs der Ruckbegrenzung als linearisiertes Filter unter der Annahme  $T = \text{TrLim}$ .

[0050] Daraus ist für den Fachmann ersichtlich, dass man eine sehr gute Dämpfung bei einer gewünschten Frequenz erhält, wenn TrLim so gewählt werden kann, dass  $1/\text{TrLim}$  auf die niedrigste Eigenfrequenz  $f_{\text{res}}$  der beteiligten Achsen fällt. Diese Erkenntnis versucht die vorliegende Erfindung mit der Adaption der Bahndynamik umzusetzen.

[0051] Dazu wird der Geschwindigkeitsverlauf auf der Bahn satzübergreifend im Voraus berechnet. Dies wird durch eine sogenannte LookAhead-Funktion erreicht.

[0052] LookAhead ist ein Verfahren im Bahnsteuerbetrieb, welches über den aktuellen Satz hinaus für mehrere NC-Teileprogrammsätze eine vorausschauende Geschwindigkeitsführung ermitteln kann. Beinhalten die programmierten Sätze nur sehr kleine Bahnwege, so wird ohne LookAhead pro Satz eine Geschwindigkeit erreicht, die zum Satzendpunkt ein Abbremsen der Achsen unter Wahrung der Beschleunigungsgrenzen ermöglicht. Dies bedeutet, dass die programmierte Geschwindigkeit überhaupt nicht erreicht wird, obwohl eine genügende Anzahl von aufbereitenden Sätzen mit nahezu tangentialen Bahnübergängen vorliegt. Mit der Funktion LookAhead ist es möglich, bei annähernd tangentialen Bahnübergängen, die Beschleunigungs- und Bremsphase über mehrere Sätze zu realisieren und somit bei kleinen Wegen einen höheren Vorschub zu erzielen. Es wird so vorausschauend auf die Geschwindigkeitsbeschränkungen abgebremst, dass eine Verletzung der Beschleunigungs- und der Geschwindigkeitsgrenze vermieden wird.

[0053] LookAhead analysiert satzbezogen die planbaren Geschwindigkeitsbeschränkungen und legt dementsprechend die benötigten Bremsrampenprofile fest. Die Vorausschau wird automatisch an Satzlänge, Bremsvermögen und zulässige Bahngeschwindigkeit angepasst. Auf diese Weise

wird der Geschwindigkeitsverlauf auf der Bahn satzübergreifend im Voraus ermittelt.

[0054] Das sich mit den vorgegebenen Dynamikgrenzwerten ergebende TrLim =  $a_{\text{Max}}/r_{\text{Lim}}$  wird nun vorzugsweise durch eine Reduzierung des maximalen Rucks rLim so verändert, dass sich für die niedrigste Eigenfrequenz der beteiligten Achsen eine gute Dämpfung ergibt.

[0055] Die Darstellung nach Fig. 10 zeigt den zu den Fig. 5 bis 8 zugehörigen Signalfussplan einer als linearisierte digitalen Filter verstandenen Ruckbegrenzung, die z. B. im Rahmen einer numerischen Steuerung durch einen Mikroprozessor oder Mikrocontroller realisiert werden kann.

[0056] Jedoch hat sich gezeigt, dass es vorteilhaft sein kann, wenn nicht jeder Beschleunigungs- oder Bremsvorgang diese Bedingung einer Ruckzeit  $\text{TrLim} = 1/f_{\text{res}}$  einhält. Die Dämpfung des linearisierten "Ruckfilters" ist zwar nur dann gegeben, bei kleinen Sollwertsprüngen ist jedoch auch die Anregung, d. h. die Eingangsgröße  $X_w$ , sehr viel kleiner und damit wird ein Überspringen aufgrund einer schwingungsfähigen Mechanik ebenfalls kleiner werden. Daher wird vorteilhafterweise ein Faktor vorgegeben, mit dem der Ruck maximal reduziert wird, um einen möglichst geringen Dynamikverlust in Kauf nehmen zu müssen.

[0057] Weiter besteht die Möglichkeit, auch TaLim und TvLim auf die gleiche Frequenz zu legen bzw. diese Frequenz mit  $2/T$  oder einem anderen Vielfachen zu erreichen. Dies verstärkt die Dämpfung bei dieser einen Frequenz, jedoch sind dabei mögliche Auswirkungen auf die Resonanzfrequenzen der anderen Achsen zu berücksichtigen (unter der Annahme, dass die niedrigste Eigenfrequenz  $f_{\text{res}}$  aller an einer Bewegung eines Maschinenelementes beteiligten Achsen bedämpft wird).

[0058] Erreicht werden kann dies, wenn die maximale Beschleunigung und die maximale Geschwindigkeit nicht erreicht werden, oder wenn diese im zulässigen Rahmen angehoben werden. Dann gilt nach den in den Fig. 5 bis 8 gezeigten Diagrammen:

$$\text{TaLim} = \text{TrLim} \text{ und } \text{TvLim} = \text{TaLim} + \text{TrLim} = 2 \cdot \text{TrLim}$$

[0059] Um die Dämpfungswirkung bei einer bestimmten Frequenz zu erreichen, kann es manchmal sinnvoll sein, den Ruckgrenzwert zu erhöhen (bei  $f > 1/\text{TrLim}$ ). Dabei sind jedoch wiederum die Auswirkungen für mehrere Achsen, deren Resonanzfrequenzen unterschiedlich sind, zu beachten. Die Dämpfung aufgrund der Einhüllenden nach Fig. 4 sollte bei Frequenzen größer als  $1/\text{TrLim}$  (also bei  $f > 1/\text{TrLim}$ ) bereits genügend hoch sein. Darauf sollte die Parametrierung des Ruckgrenzwertes ausgelegt werden.

[0060] Zur Optimierung der gewünschten Sperrfrequenz auf der Bahn kann zum einen das Minimum der Resonanzfrequenzen  $f_{\text{res}}$  aller an der Bahn beteiligten Achsen für die Beurteilung von TrLim verwendet werden. Bei relativ ähnlichen Resonanzfrequenzen ist ein Mittelwert aller beteiligten Achsen jedoch insgesamt günstiger. Die Ermittlung einer kritischen Resonanzfrequenz  $f_{\text{res}}$  auf der Bahn kann zum anderen durch eine Gewichtung der Resonanzfrequenzen aller beteiligter Achsen erfolgen, wobei auch der Beitrag der jeweiligen Achse zur Bahn berücksichtigt wird.

[0061] Eine weitere Optimierung besteht in einer Vermeidung von Nebenmaxima. Dazu werden auch Beschleunigungs- und Bremsvorgänge mit TrLim aus  $[1/T, 2/T]$  durch Veränderung des Rucks auf ein TrLim mit einer höheren Dämpfung gebracht. Damit können höhere Ruckwerte bei gleicher Dämpfung erreicht werden, da die Auswirkung der Einhüllenden stark abnimmt. Es müssen jedoch dann immer die Auswirkungen bei unterschiedlichen Resonanzfrequenzen der an der Bahn beteiligten Achsen, sowie die Auswir-

kungen der Kontur betrachtet werden.

[0062] Die bisher beschriebene Funktion betrachtet nur die Änderungen der Bahngeschwindigkeit, nicht aber die axialen Rückverläufe, die sich aus der Konturkrümmung ergeben. Am einfachsten lässt sich diese Problemstellung bei einer Kreisbahn erläutern.

[0063] Die beiden an einer kreisförmigen Kontur beteiligten Achsen weisen bei konstanter Bahngeschwindigkeit in der Position, in der Geschwindigkeit, in der Beschleunigung und auch im Ruck einen sinusförmigen Verlauf mit der Frequenz  $f = v/(2 \cdot r \cdot \pi)$  auf. Liegt diese Frequenz im Bereich der Resonanzfrequenz  $f_{res}$  der Achse, so wird diese stark angeregt.

[0064] Um solche Überlastungen der Achse zu vermeiden, wird beispielsweise für den gewünschten Konturverlauf der maximale Ruck und die maximale Beschleunigung für diese Achse begrenzt. Kann dieser Ruck nicht eingehalten werden, so wird die Bahngeschwindigkeit abgesenkt.

[0065] Die Betrachtung des Maximalwertes kann auch hier durch eine Betrachtung der resultierenden zeitlichen Verläufe ergänzt werden. Bei einem Kreis ist dies relativ einfach möglich, indem wie bereits bei einer bekannten Funktion zur Bahnglättung Minima und Maxima der Geschwindigkeit gesucht werden und diese Zeit mit der Resonanzfrequenz verglichen wird. Wird eine kritische Frequenz erkannt, so wird die Bahngeschwindigkeit abgesenkt.

[0066] Bei beliebigen Polynomen wird wie folgt vorgegangen. Für eine angenommene konstante Bahngeschwindigkeit wird der vorliegende Geschwindigkeitsverlauf der einzelnen Achsen abschnittsweise analysiert. Die Grenzen der einzelnen Abschnitte sind die Zeitpunkte, an denen Minima oder Maxima der Geschwindigkeit vorliegen. Für diese Abschnitte wird dann eine maximale Bahngeschwindigkeit vorgegeben, mit der das Geschwindigkeitsprofil keine oder nur geringfügige Anregungen bei der Resonanzfrequenz der betroffenen Achse aufweist.

[0067] Bei so einer Analyse treten häufig sehr hochfrequente Anteile auf, die sich bei bisherigen Untersuchungen mit der Erfindung jedoch als relativ unkritisch erwiesen haben. Diese Anteile können daher im Extremfall komplett ignoriert werden. Als Alternativen bestehen als weitere Möglichkeiten:

- der untersuchte Verlauf wird generell geglättet und danach auf Maxima und Minima untersucht oder
- die hochfrequenten Anteile werden auf ihre Auswirkungen hin untersucht (Betrachtung der Amplitude, Flächenkriterien).

[0068] Auch Transformationen verhalten sich aus der Sicht der Bahngeschwindigkeit identisch zu axialen Verläufen aufgrund der Konturkrümmung. Auch hier treten bei konstanter Bahngeschwindigkeit axiale Brems- und Beschleunigungsvorgänge auf, die nach dem Stand der Technik nur auf Maximalwerte begrenzt werden. Die Abhilfe schafft hier ebenfalls die obige Problemlösung.

[0069] Die vorangehenden Ausführungen sollen nun noch anhand von zwei exemplarischen Situationen veranschaulicht werden. Zur vereinfachten Darstellung wird in Fig. 11-14 der Einsatz der Erfindung ohne Ruckbegrenzung, nur mit Beschleunigungsbegrenzung aufgezeigt. Dadurch kann die satzübergreifende Wirkungsweise der Erfindung leichter dargestellt werden. Die Zeit, die damit optimiert wird ist nun  $T_{Lim}$  statt  $T_{rLim}$ .

[0070] Die Fig. 11 zeigt dazu ein erstes Beispiel eines zeitoptimalen, beschleunigungsbegrenzten Bahngeschwindigkeitsverlaufs ohne Anpassung der Bahndynamik. Der Verlauf der Bahngeschwindigkeit  $v_B$  mit dem Geschwindig-

keitswert  $v_2$  ist über die Zeit  $t$  aufgetragen und weist Zeitpunkte  $t_0$  bis  $t_7$  auf, zu denen sich der Verlauf von  $v_B$  jeweils ändert.

[0071] Des Weiteren wird die folgende Parametrierung zugrundegelegt:

- Faktor, um den die Beschleunigung maximal verringert wird: 1,5
- Resonanzfrequenz der 1. beteiligten Achse AX1: 20 Hz
- Resonanzfrequenz der 2. beteiligten Achse AX2: 10 Hz
- Resonanzfrequenz der 3. beteiligten Achse AX3: 20 Hz

[0072] Bei Bahnbewegungen, an denen die Achse AX2 beteiligt ist, werden alle Brems- und Beschleunigungsvorgänge angepasst, die maximal eine Zeit von  $1/10 \text{ Hz} = 100 \text{ ms}$  in Anspruch nehmen. Sind nur die Achsen AX1 oder AX3 beteiligt, so werden alle Brems- und Beschleunigungsvorgänge angepasst, die maximal eine Zeit von  $1/20 \text{ Hz} = 50 \text{ ms}$  in Anspruch nehmen. In den Fig. 11 und 12 wird diese Zeit als 'adapt xy' bezeichnet.

[0073] Die Darstellung nach Fig. 12 zeigt nun den aus Fig. 11 resultierenden Bahngeschwindigkeitsverlauf bei Anpassung der Dynamik nach der Erfindung. Der Beschleunigungsvorgang zwischen den Zeitpunkten  $t_0$  und  $t_1$  und der Bremsvorgang zwischen  $t_2$  und  $t_3$  werden durch eine Anpassung der Beschleunigung auf die Zeit  $t_{adapt01}$  bzw.  $t_{adapt23}$  "gestreckt".

[0074] Der Beschleunigungsvorgang zwischen  $t_4$  und  $t_5$  wird mit einer um den Faktor 1,5 reduzierten Beschleunigung durchgeführt, wie das durch den oben genannten Faktor parametrisiert wurde. Der Beschleunigungsvorgang ist dennoch vor der Zeit  $t_{adapt45}$  beendet. Der Bremsvorgang zwischen  $t_6$  und  $t_7$  bleibt unverändert, da er länger als  $t_{adapt67}$  dauert.

[0075] Die Fig. 13 und 14 zeigen ein weiteres Beispiel, jedoch mit einer weiter vorteilhaften Kombination aus Anpassung der Bahndynamik nach der Erfindung in Verbindung mit einer Glättung der Bahngeschwindigkeit. Die Fig. 13 zeigt dabei einen zeitoptimalen, beschleunigungsbegrenzten Bahngeschwindigkeitsverlauf mit den Geschwindigkeiten  $v_2$  und  $v_{12}$  ohne Anpassung der Bahndynamik, ebenfalls mit Zeitpunkten  $t_0$  bis  $t_7$ .

[0076] Die zugrundegelegten Parameter betragen dabei:

- Bahnglättungsfaktor: 80%
- Faktor, um den die Beschleunigung maximal verringert wird: 3
- Resonanzfrequenz der 1. beteiligten Achse AX1: 20 Hz
- Resonanzfrequenz der 2. beteiligten Achse AX2: 20 Hz
- Resonanzfrequenz der 3. beteiligten Achse AX3: 20 Hz

[0077] Die Darstellung nach Fig. 14 zeigt den resultierenden Bahngeschwindigkeitsverlauf mit erfindungsgemäßer Anpassung der Bahndynamik und zusätzlicher Bahnglättung. Der gesamte Beschleunigungs- und Bremsverlauf zwischen  $t_1$  und  $t_2$  entfällt nunmehr, da die Verlängerung der Bearbeitungszeit ohne den Beschleunigungsvorgang auf  $v_{12}$  kleiner als 80% ist.

[0078] Der gesamte Beschleunigungs- und Bremsverlauf zwischen  $t_3$  und  $t_5$  erfüllt diese Bedingung nicht oder dauert länger als parametrisiert (hier:  $2/20 \text{ Hz} = 100 \text{ ms}$ ). Der Beschleunigungsvorgang von  $t_3$  nach  $t_4$  ist jedoch kürzer als



50 ms. (= 1/20 Hz) und wird daher mit einer um den Faktor 3 geringeren Beschleunigung durchgeführt.

[0079] Der nach der Bahnglättung verbleibende Beschleunigungsvorgang bis  $t_1$  wird durch die Adaption der Bahndynamik auf den Zeitraum bis  $t_1$  gedehnt.

[0080] Dieses Beispiel macht deutlich, warum es von Vorteil sein kann, die Adaption der Bahndynamik im Bahnsteuerbetrieb möglichst zusammen mit der Bahnglättung einzusetzen. Nur die Beschleunigungs- oder Bremsvorgänge auf der Bahn, die von der Bahnglättung nicht eliminiert werden, müssen damit noch für die jeweilige Maschine optimiert werden.

#### Patentansprüche

1. Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung (v) eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine wie einer Werkzeugmaschine, einem Roboter oder dergleichen, wobei eine Bewegungsbahn (x) des Maschinenelementes in unmittelbar aufeinanderfolgende interpolierbare Bewegungsabschnitte aufgelöst ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass Beschleunigungsvorgänge (a) mit bei der Interpolation resultierenden zugehörigen Ruckprofilen (r), die bei oder in einem Bereich nahe einer kritischen Eigenfrequenz ( $f_{res}$ ) des Maschinenelementes oder der Maschine liegen, so adaptiert werden, dass eine Zeit ( $TrLim$ ), die mit einem maximal zulässigen Ruck ( $rLim$ ) verfahren wird, im wesentlichen dem Kehrwert dieser kritischen Eigenfrequenz ( $f_{res}$ ) entspricht.
2. Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass bei der Interpolation resultierende Ruckprofile (r) mit einem bei oder in einem Bereich nahe einer kritischen Eigenfrequenz ( $f_{res}$ ) des Maschinenelementes oder der Maschine liegenden Verlauf anhand eines satzübergreifend über mehrere interpolierbare Bewegungsabschnitte im Voraus bestimmten Geschwindigkeitsverlaufs (v) des Maschinenelementes auf dessen Bewegungsbahn (x) ermittelt werden.
3. Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, dass zur Adaption von ermittelten kritischen Beschleunigungsvorgängen (a) der maximal zulässige Ruck ( $rLim$ ) solange variiert wird, insbesondere reduziert wird, bis die Rückzeit ( $TrLim$ ) im wesentlichen dem Kehrwert dieser kritischen Eigenfrequenz ( $f_{res}$ ) entspricht.
4. Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, dass ein Faktor vorgegeben wird, mit dem der maximal zulässige Ruck ( $rLim$ ) maximal reduziert wird.
5. Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes nach einem der vorangehenden Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass als kritische Eigenfrequenz ( $f_{res}$ ) das Minimum der Eigenfrequenzen aller an der Bewegungsbahn (x) des Maschinenelementes beteiligten Achsen dient.
6. Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes nach einem der vorangehenden Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass als kritische Eigenfrequenz ( $f_{res}$ ) ein Mittelwert der Eigenfrequenzen aller an

der Bewegungsbahn (x) des Maschinenelementes beteiligten Achsen dient.

7. Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes nach einem der vorangehenden Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die kritische Eigenfrequenz ( $f_{res}$ ) durch eine Gewichtung der Eigenfrequenzen aller an der Bewegungsbahn (x) des Maschinenelementes beteiligten Achsen erfolgt.

8. Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass eine Gewichtung anhand des Beitrags einer jeweiligen beteiligten Achse zur Bewegungsbahn (x) des Maschinenelementes erfolgt.

9. Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass für jede beteiligte Achse eine separate Adaption kritischer Beschleunigungsvorgänge erfolgt, wobei ein axiales Ruckprofil analysiert wird, indem für eine angenommene konstante Bahngeschwindigkeit des Maschinenelementes der resultierende axiale Geschwindigkeitsverlauf analysiert wird.

10. Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes nach Anspruch 9, dadurch gekennzeichnet, dass bei der Interpolation resultierende axiale Ruckprofile mit einem bei oder in einem Bereich nahe einer kritischen Eigenfrequenz ( $f_{res}$ ) der jeweiligen Achse liegenden Verlauf abschnittsweise satzübergreifend im Voraus ermittelt werden, wobei ein Abschnitt jeweils durch Minima oder Maxima des axialen Geschwindigkeitsverlaufs gebildet wird.

11. Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes nach Anspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, dass zur Adaption von ermittelten kritischen Beschleunigungsvorgängen für jeden analysierten Abschnitt des axialen Geschwindigkeitsverlaufs die maximale Bahngeschwindigkeit (v) solange reduziert wird, bis die Rückzeit ( $TrLim$ ) im wesentlichen dem Kehrwert der kritischen Eigenfrequenz ( $f_{res}$ ) der jeweiligen Achse entspricht.

12. Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes nach einem der vorangehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, dass auch die längstmögliche Zeit, mit der mit maximaler Beschleunigung (a) verfahren werden kann ( $TaLim$ ) und/oder mit der mit maximaler Geschwindigkeit (v) verfahren werden kann, auf die gleiche Frequenz wie die Rückzeit ( $TrLim$ ) oder ein Vielfaches davon adaptiert wird.

13. Numerische Steuerung zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung (v) eines bewegbaren Maschinenelementes einer numerisch gesteuerten industriellen Bearbeitungsmaschine wie einer Werkzeugmaschine, einem Roboter oder dergleichen, wobei ein Interpolator zur Interpolation einer in unmittelbar aufeinanderfolgende interpolierbare Bewegungsabschnitte aufgelösten Bewegungsbahn (x) des Maschinenelementes vorgesehen ist, dadurch gekennzeichnet, dass durch eine Ruckbegrenzung solche Beschleunigungsvorgänge (a) mit bei der Interpolation resultierenden zugehörigen Ruckprofilen (r), die bei oder in einem Bereich nahe einer kritischen Eigenfrequenz ( $f_{res}$ ) des Maschinenelementes oder der Maschine liegen, so adaptierbar sind, dass eine Zeit ( $TrLim$ ), die mit einem ma-



ximal zulässigen Ruck ( $r_{Lim}$ ) verfahren wird, im wesentlichen dem Kehrwert dieser kritischen Eigenfrequenz ( $f_{res}$ ) entspricht.

14. Numerische Steuerung zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass bei der Interpolation resultierende Ruckprofile ( $r$ ) mit einem bei oder in einem Bereich nahe einer kritischen Eigenfrequenz ( $f_{res}$ ) des Maschinenelementes oder der Maschine liegenden Verlauf durch die Ruckbegrenzung anhand eines satzübergreifend über mehrere interpolierbare Bewegungsabschnitte im Voraus bestimmten Geschwindigkeitsverlaufs ( $v$ ) des Maschinenelementes auf dessen Bewegungsbahn ( $x$ ) ermittelbar sind.

15. Numerische Steuerung zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes nach Anspruch 14, dadurch gekennzeichnet, dass die Ruckbegrenzung den maximal zulässigen Ruck ( $r_{Lim}$ ) zur Adaption von ermittelten kritischen Beschleunigungsvorgängen ( $a$ ) solange variiert, insbesondere reduziert, bis die Ruckzeit ( $Tr_{Lim}$ ) im wesentlichen dem Kehrwert dieser kritischen Eigenfrequenz ( $f_{res}$ ) entspricht.

16. Numerische Steuerung zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass die Ruckbegrenzung einen Faktor vorgibt, mit dem der maximal zulässige Ruck ( $r_{Lim}$ ) maximal reduzierbar ist.

17. Numerische Steuerung zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes nach einem der vorangehenden Ansprüche 12 bis 15, dadurch gekennzeichnet, dass der Ruckbegrenzung als kritische Eigenfrequenz ( $f_{res}$ ) das Minimum der Eigenfrequenzen aller an der Bewegungsbahn ( $x$ ) des Maschinenelementes beteiligten Achsen dient.

18. Numerische Steuerung zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes nach einem der vorangehenden Ansprüche 13 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass der Ruckbegrenzung als kritische Eigenfrequenz ( $f_{res}$ ) ein Mittelwert der Eigenfrequenzen aller an der Bewegungsbahn ( $x$ ) des Maschinenelementes beteiligten Achsen dient.

19. Numerische Steuerung zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes nach einem der vorangehenden Ansprüche 13 bis 16, dadurch gekennzeichnet, dass die Ruckbegrenzung Mittel zur Gewichtung der Eigenfrequenzen aller an der Bewegungsbahn ( $x$ ) des Maschinenelementes beteiligten Achsen umfasst.

20. Numerische Steuerung zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes nach Anspruch 19, dadurch gekennzeichnet, dass die Ruckbegrenzung eine Gewichtung anhand des Beitrags einer jeweiligen beteiligten Achse zur Bewegungsbahn ( $x$ ) des Maschinenelementes vornimmt.

21. Numerische Steuerung zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass durch die Ruckbegrenzung für jede beteiligte Achse eine separate Adaption kritischer Beschleunigungsvorgänge durchführbar ist, wobei ein axiales Ruckprofil analysierbar ist, indem für eine angenommene konstante Bahngeschwindigkeit des Maschinenelementes der resultierende axiale Geschwindigkeitsverlauf analysiert wird.

22. Numerische Steuerung zur ruckbegrenzten Ge-

schwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes nach Anspruch 21, dadurch gekennzeichnet, dass durch die Ruckbegrenzung resultierende axiale Ruckprofile mit einem bei oder in einem Bereich nahe einer kritischen Eigenfrequenz ( $f_{res}$ ) der jeweiligen Achse liegenden Verlauf abschnittsweise satzübergreifend im Voraus ermittelbar sind, wobei ein Abschnitt jeweils durch Minima oder Maxima des axialen Geschwindigkeitsverlaufs gebildet wird.

23. Numerische Steuerung zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes nach Anspruch 21 oder 22, dadurch gekennzeichnet, dass zur Adaption von ermittelten kritischen Beschleunigungsvorgängen für jeden analysierten Abschnitt des axialen Geschwindigkeitsverlaufs durch die Ruckbegrenzung die maximale Bahngeschwindigkeit ( $v$ ) solange reduzierbar ist, bis die Ruckzeit ( $Tr_{Lim}$ ) im wesentlichen dem Kehrwert der kritischen Eigenfrequenz ( $f_{res}$ ) der jeweiligen Achse entspricht.

24. Steuerungsverfahren zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes nach einem der vorangehenden Ansprüche 13 bis 23, dadurch gekennzeichnet, dass durch die Ruckbegrenzung auch die längstmögliche Zeit, mit der mit maximaler Beschleunigung ( $a$ ) verfahren werden kann ( $Ta_{Lim}$ ) und/oder mit der mit maximaler Geschwindigkeit ( $v$ ) verfahren werden kann, auf die gleiche Frequenz wie die Ruckzeit ( $Tr_{Lim}$ ) oder ein Vielfaches davon adaptierbar ist.

25. Numerische Steuerung zur ruckbegrenzten Geschwindigkeitsführung eines bewegbaren Maschinenelementes nach einem der vorangehenden Ansprüche 13 bis 24, dadurch gekennzeichnet, dass die Ruckbegrenzung als ein linearisiertes digitales Filter ausgestaltet ist, das in jedem Arbeitspunkt ( $x_{Soll}$ ) des Maschinenelementes einen zugehörigen Rücksollwert ( $r_{Soll}$ ) liefert.

---

Hierzu 6 Seite(n) Zeichnungen

---

- Leerseite -

**THIS PAGE BLANK (USPTO)**

FIG 1

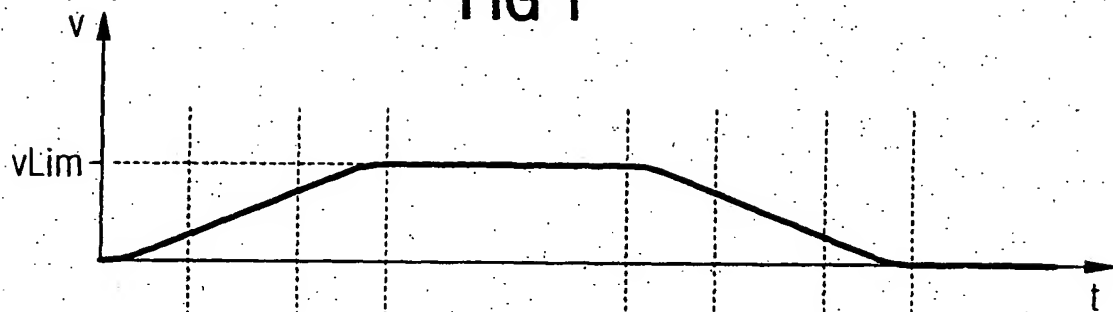


FIG 2

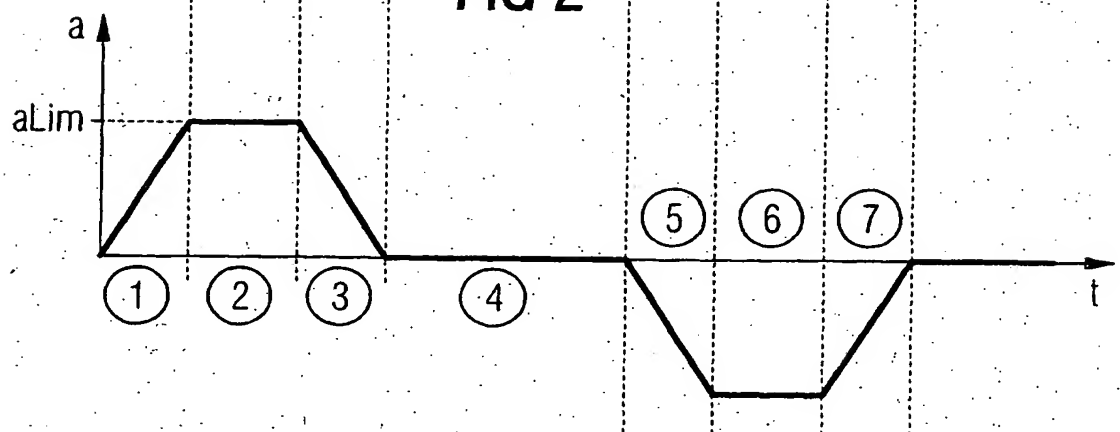


FIG 3

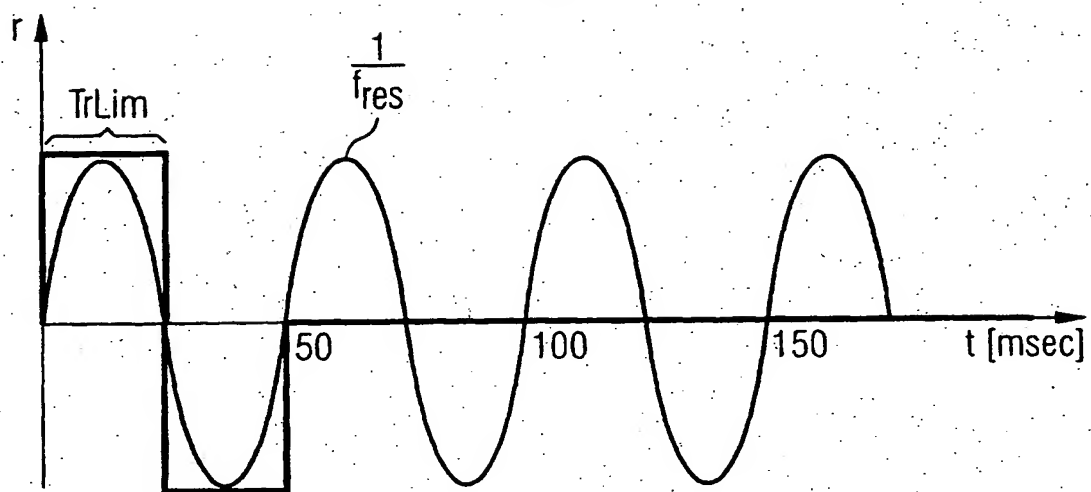


FIG 4

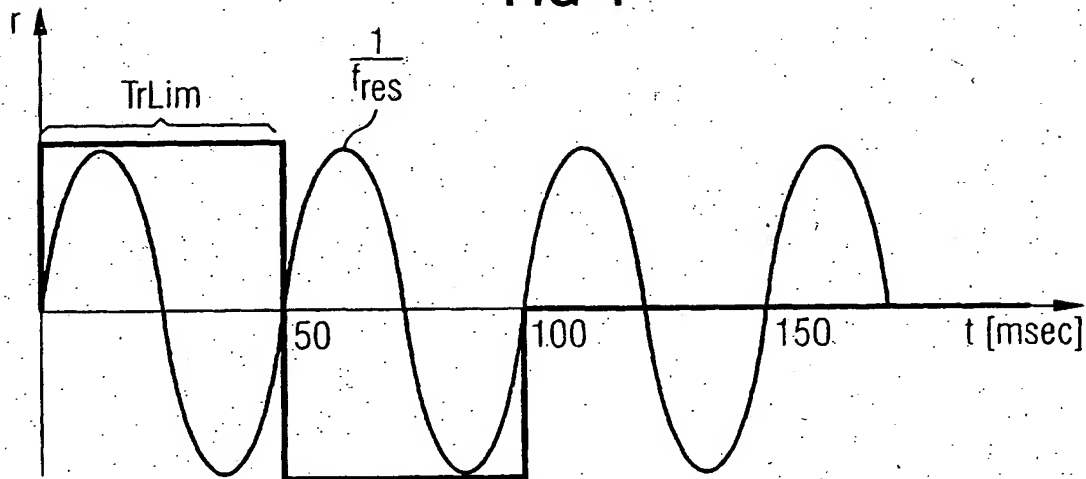


FIG 5

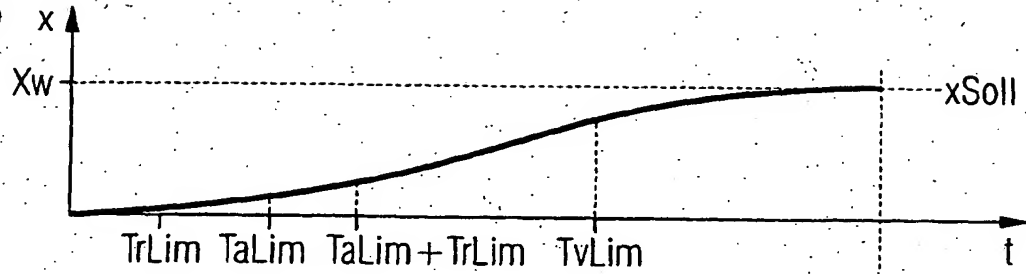


FIG 6

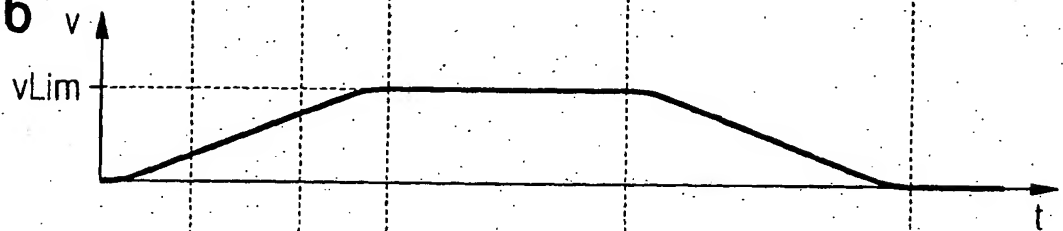


FIG 7

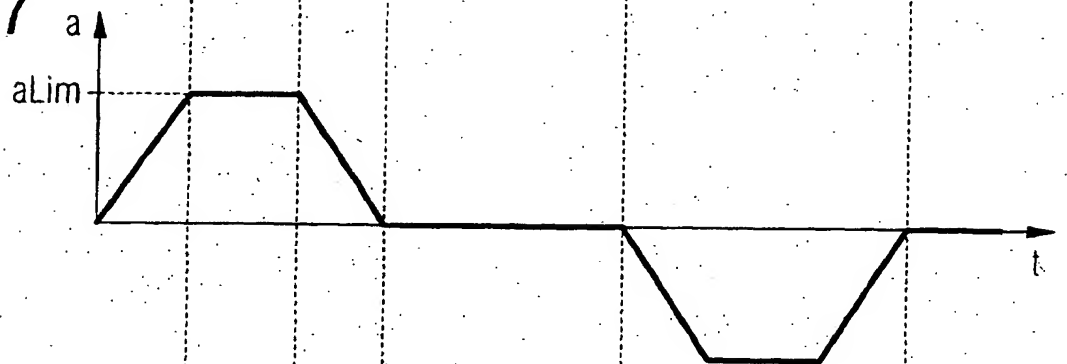


FIG 8

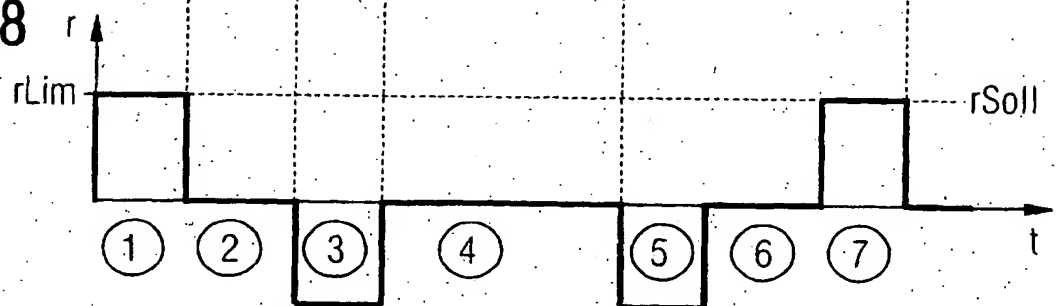




FIG 11

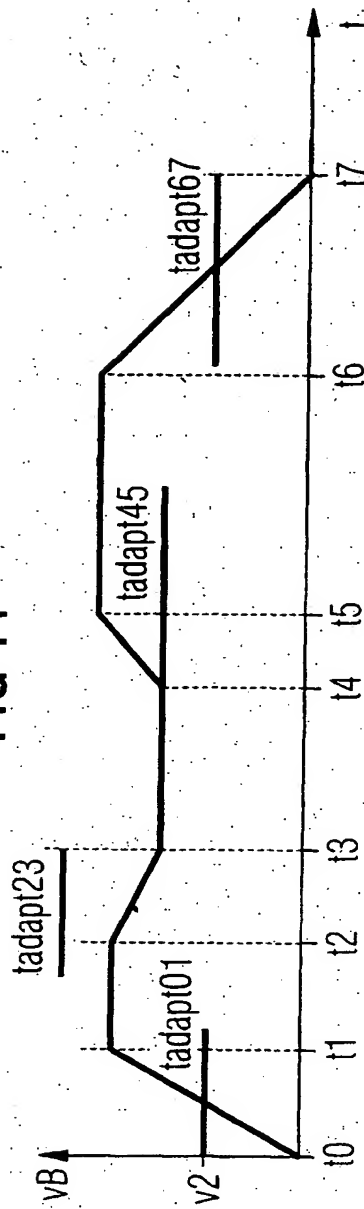


FIG 12

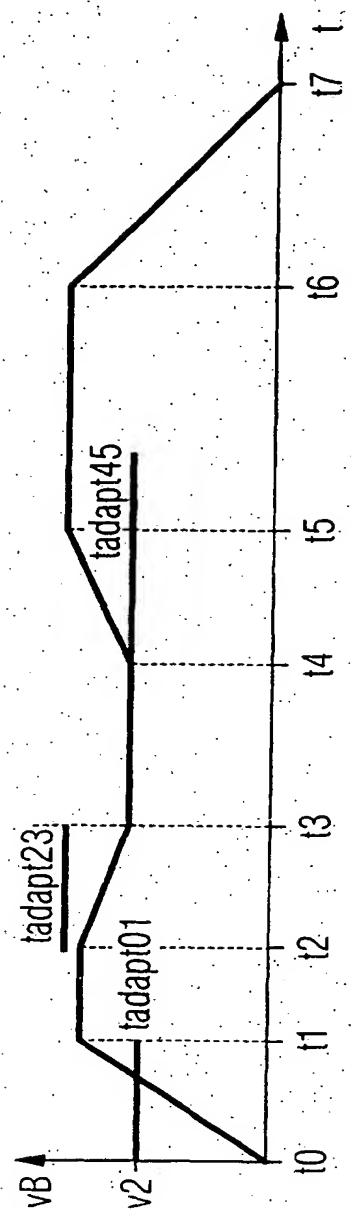




FIG 13

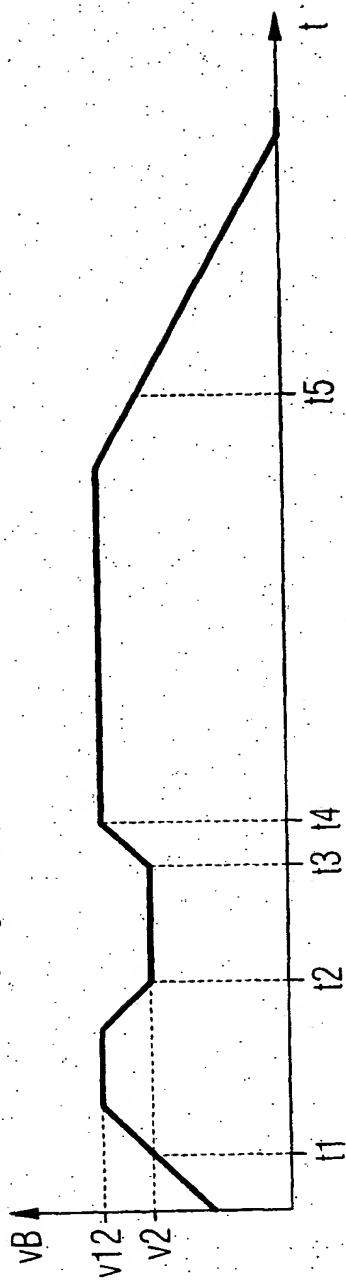


FIG 14

